

Abstract

極低温検出器はサブケルビンオーダーの極低温下で動作する熱検出器である。光子に対して非常に高い感度が実現できるため、天文学分野で盛んに研究が進んでいる。2010 年前後より実用化され始め、今後の多くの天文観測装置で採用の計画がある。しかし、その性能を引き出すには、安定した低雑音環境が必要である。主要な雑音源の一つに検出器外部からの電磁干渉が知られており、これまでの天文観測装置でも性能の劣化が報告されている。しかし、電磁干渉設計についての方法論は、標準化が進んでいる衛星設計分野でも、未確立である。

2023 年打ち上げ予定の X 線撮像分光衛星 XRISM には、X 線マイクロカロリメトリをベースとした極低温分光装置 *Resolve* が搭載される。50 mK 下で動作し、その設計は短命に終わってしまった X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載された軟 X 線分光装置 SXS を踏襲している。SXS が実現した X 線帯域での革新的な分光能力（軌道上で $\Delta E_{\text{FWHM}} \sim 5 \text{ eV}@6 \text{ keV}$ ）を引き継ぎ、新たなサイエンスを切り拓くことが期待される。

この SXS においても、衛星バス系から検出器への電磁干渉が見られた。しかし、そのメカニズムの理解は確立せず、また一部は軌道上での評価に委ねられていた。これらの課題は SXS の後継機たる *Resolve* に引き継がれた。これに取り組むのが本論文である。以下の 3 つの課題（図 1）を設定する。

1. 衛星姿勢制御系由来の低周波磁場干渉
2. 衛星通信系由来の高周波電磁場干渉
3. 衛星電源系由来の伝導性干渉

それぞれの課題に対して、衛星バス部と装置ミッション部間の電磁的インターフェイスを定義した上で、サブシステム（装置ミッション部）レベル、システム（衛星バス部 + 装置ミッション部）レベルの試験を実施し、電磁シミュレーションを行って、end-to-end の定量的評価を行った。これにより、衛星電磁干渉による *Resolve* 検出器の観測性能劣化のリスクを打ち上げ前に十分低減することができた。各課題で得た具体的成果は以下の通りである。

(1) 低周波磁場干渉について。SXS では、衛星姿勢アクチュエータの一つである磁気トルカ (MTQ) のパルス幅変調駆動周波数 127 Hz 及びその高調波が検出器の線ノイズとして顕著に現れ、分光性能を劣化させていたものの、そのメカニズムは理解されていなかった。そこで、巨大ソレノイドである MTQ が作る磁場がミッション系とカップルするという仮定のもと調査した。サブシステム試験では、ASTRO-H 衛星 MTQ の予備品を条件を変えて駆動し検出器の応答を調べたところ、SXS と同じく、127 Hz およびその高調波に線ノイズが観測された。更に、MTQ と検出器の距離を変更することで、磁場寄与成分が大半であることがわかった。磁場シミュレーションの結果もこれを支持する。システム試験では MTQ3 軸のノイズ寄与について SXS と定性的に整合する結果が得られた。得られた結果を元に、結合のメカニズムを推定した。更に、軌道上のノミナル運用を模擬した試験を行って、観測性能の劣化は SXS と同程度以下であることがわかった。また、MTQ 駆動条件に応じた観測性能劣化をシミュレートするモデルも作成し、軌道上での変化にも対応できるように準備した。

(2) 通信系由来の高周波電磁場干渉について。*Resolve* の極低温検出器が格納されている真空槽 (Dewar) の上部にはゲートバルブという金属蓋がある。地上では真空を保つために閉じているが、軌道上で本格観測が始まると開かれ、Faraday ケージが破れる。このときに衛星通信系の用いる高周波電波が検出器に与える影響を評価した。これは本格運用開始前に終了した SXS で未評価の課題である。通信系アンテナからの検出器までの光路を、ゲートバルブ上をインターフェイスとして 2 つに分け、前半を電磁界シミュレーション、後半を試験で評価した。シミュレーションでは、スーパーコンピュータ富岳と衛星詳細 CAD モデルを用いて、Maxwell 方程式の数値計算をし、軌道上運用でインターフェイス点に作られる電場強度の最悪ケースを見積もった。試験では、その見積もり値より十分強い電波をインターフェイスから Dewar 内部へ入射した。検出器で有意な応答はみられなかったことから、通信系由来の高周波電磁場干渉による観測性能の劣化は無視してよいと結論付けた。

(3) 電源系由来の伝導性干渉について。XRISM 衛星には様々な電力消費機器があり、それらが 1 つのバス電源を

極低温検出器 と 電磁干渉 (S.1)

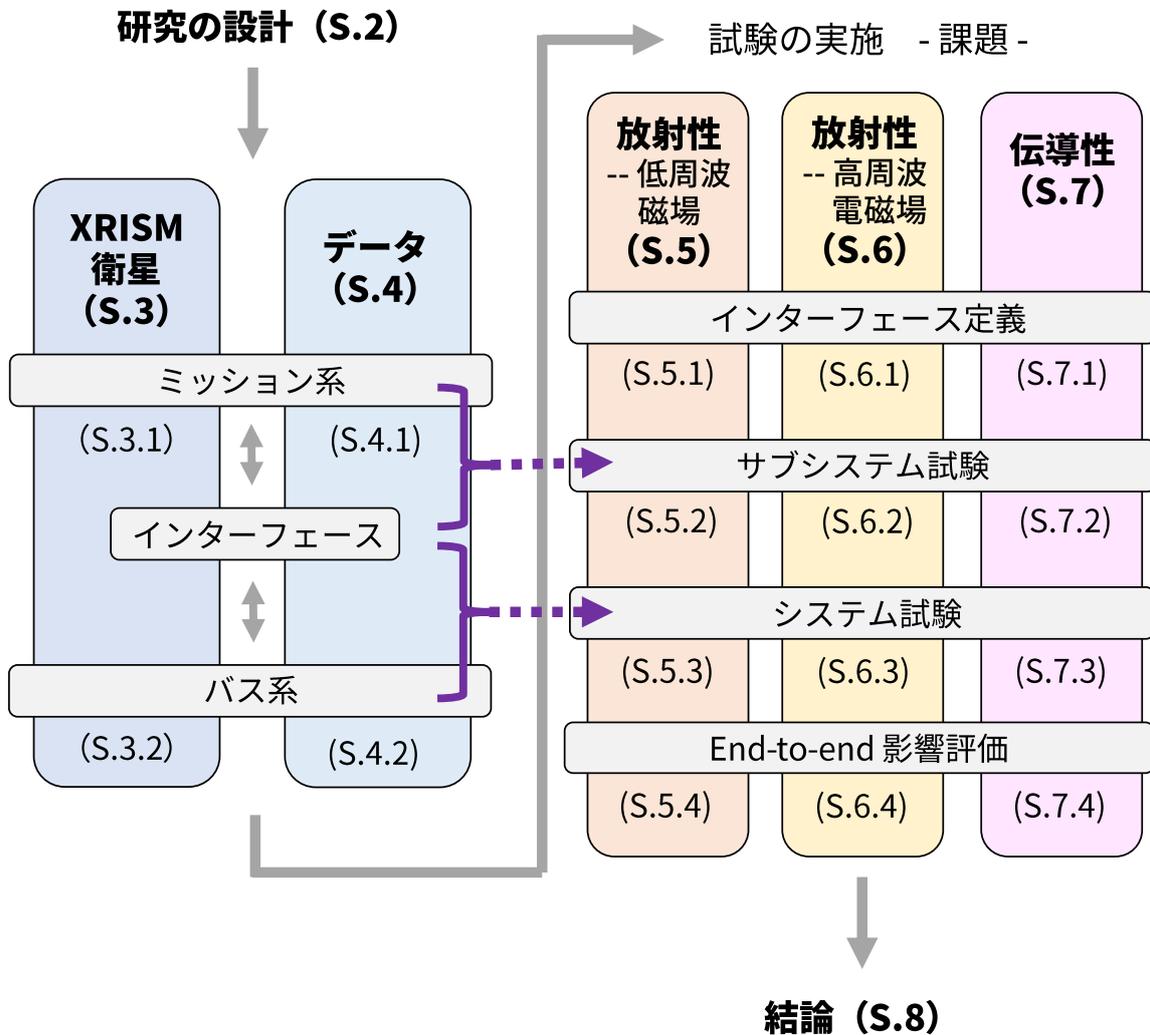


図 1. 本修論の構成

共有する。従って、各機器から発生する電磁雑音がバス給電を通して *Resolve* 装置へと侵入する。この伝導性干渉を評価した。まず、衛星と装置間のインターフェースレベルを設定し、サブシステム試験では人工的な正弦波ゆらぎを持つバス電圧を給電することで、検出器の応答を測定した。また、システム試験では、様々な衛星運用条件で、インターフェイス点におけるノイズレベルや検出器の出力を測定した。これにより、end-to-end 評価を行って、定常運用の範囲内で伝導性干渉による観測性能の変化はほぼ見られないことを示した。

1
2
3
4
5